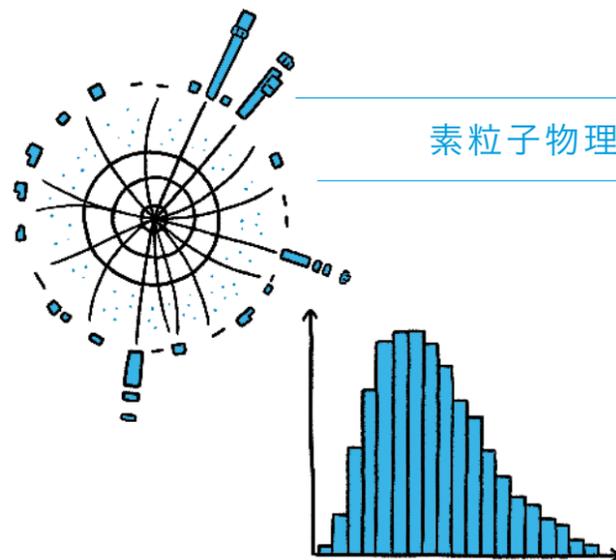


04 QUANTUM LEAP BY QUANTUM TECHNOLOGY

量子技術で物理学にブレイクスルーを

発足から50年、加速器を使った高エネルギー実験を中心に素粒子を研究してきたICEPP。計算やデバイスに量子力学の知見を使うことで、素粒子の難問にどのように立ち向かうのか？を見ていこう。



素粒子物理学実験の課題

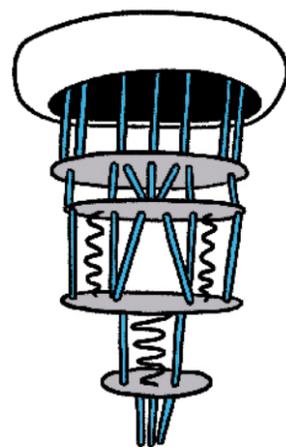
現在の素粒子実験では、それぞれのセンサーが光子をはじめとする粒子のある、なしを判定し、その情報を記録する。粒子のある、なしというのは古典的な情報の記録であり、高エネルギーの環境では、粒子を古典的に扱うことで十分な精度が得られる場合も多い。一方で、実験データが膨大になってくると、低いエネルギーでの粒子反応を取り入れた解析が重要になり、そこでは量子もつれなど粒子の量子力学的な性質が現れてくる。

ICEPPでは、高輝度LHC-ATLAS実験に備えて、実験データを解析するために量子コンピュータで機械学習を行なう量子機械学習の研究も進めている。実用化までにはまだ時間が必要だが、実験データの特徴に合わせて、どのように量子計算を使うことができるか探究していく。

素粒子物理学の研究にコンピュータは欠かせない存在となっている。ヒッグス粒子を発見したことで知られるLHCのATLAS実験では、これまで500ペタバイトものデータが蓄積されている。この膨大なデータを処理、解析するために、世界中に分散した計算資源をネットワークで接続するグリッドコンピューティングが採用された。

ただ、LHCの実験データ量は増加傾向だ。2030年に加速器と検出器を大幅にアップグレードした高輝度LHC-ATLAS実験がスタートすると、データ量が1桁増え、エクサバイトが当たり前になってくる。このままでは従来の古典コンピュータ技術では対応できなくなる日がくるかもしれない。

ICEPPで量子コンピュータを研究し始めた動機のひとつはここにある。膨大な実験データを処理できるようになれば、新たな発見につながるのではないかと期待された。そこで、検出器データの情報を組み合わせ、作られた粒子を再構成する方法の研究を進めてきた。



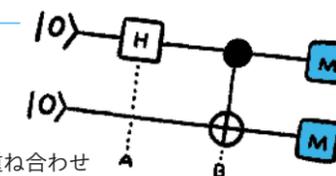
素粒子の挙動を時系列に解き明かす

現在、量子コンピュータの活用法として期待されているのが、複雑な素粒子の世界のシミュレーションだ。素粒子物理学のシミュレーションは、格子ゲージ理論を基礎にして、古典コンピュータでも行なわれ、大きな成果を上げている。だが、現状では計算できないパラメータ領域があったり、素粒子同士の相互作用を計算したりするのは難しい。

古典コンピュータでは、素粒子の運動などはラグランジアン形式で記述され、計算される。時間と空間を一括して扱い、その中での場の運動の歴史を記述する。量子力学での粒子の振る舞いが確率でしか表現できない理由はここに起因する。モンテカルロ法を用いて素粒子の相互作用などを計算しようとしても、古典コンピュータで効率的な計算をするのは難しい。

それに対し量子コンピュータは、重ね合わせや量子もつれを利用して、計算対象となる粒子の量子状態やその変化を表現することができるので、粒子の動きや相互作用を時系列に記述、計算していくハミルトニアン形式と相性がいい。量子コンピュータが発達することで、素粒子のさまざまな状態や相互作用なども精密に計算できるのではないかと期待される。

量子コンピュータはまだ黎明期で、基礎的な研究が積み重ねられている段階だ。ICEPPでは、素粒子物理学のシミュレーションを実現するために必要な量子計算システムの見積、素粒子の現象をハミルトニアン形式で表現するための定式化、量子コンピュータに実行させるアルゴリズムの開発など、さまざまな側面からの研究を進めている。



量子デバイスで新たな実験手法を提案

量子コンピュータは0と1の重ね合わせを表現できる量子ビットを使って計算する。この量子ビットは計算だけでなく、センサーとしても活用できる。ICEPPでは、新しい素粒子の検出法を確立しようと、超伝導量子ビットの開発を独自に進めている。

超伝導量子ビットはマイクロ波をとらえやすい性質をもっていて、この特性を利用して暗黒物質を探索する新たなデバイスとして使用できると期待されている。超伝導量子ビットは、他の方式の量子ビットよりも実用化が進んでいるが、数年前までは作製方法自体が秘匿されていた。

だが、この数年で、量子ビットのつくり方の知見を公開し、共有しようという動きが進み、現在ではつくり方を記した論文がたくさん発表されている。ICEPPでは

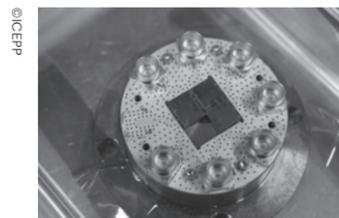
それらの論文を参考にしながら、量子ビットの開発にいち早く取り組んできた。その開発の速さにIBMの技術者も驚いたという。

超伝導量子ビットセンサーによる検出が期待されているもの

が、暗黒物質候補のひとつである未知の粒子アクシオンだ。暗黒物質は、WIMPと総称される反応性の低い重い粒子が候補のひとつとして考えられており、加速器実験でも探索されている。それに対しアクシオンは質量が軽く、加速器実験では検出しにくい、超伝導量子ビットは軽い質量の粒子の検出に向いている。

量子ビットやそれを並べた量子デバイスをつくることは、量子コンピュータをつくることと深いつながりがある。しかし、量子コンピュータは外界と遮断し、磁場の影響を受けないようにすることが重要なのにに対し、アクシオンを探索するセンサーとして用いるためには外界に開き、磁場の中でも高い性能を出すことが求められる。

このような違いを克服し、高性能の量子センサーが開発され、アクシオンが検出されれば、新たな素粒子理論を構築するための大きな一歩となる。磁場耐性量子センサーが実現すれば、高エネルギー実験をはじめ、幅広い物理実験で新たな検出装置として使用できると注目されている。量子デバイスがどのような物理学を切り開いていくのか、期待が高まる。



©ICEPP